

自动化丛书



快速随动系统 及调节器的结构原理

〔苏联〕A. Я. 列尔涅尔著 胡保生译

上海科学技术出版社

73.823
211

自动化丛书

9

快速随动系统 及调节器的结构原理

〔苏联〕A. Я. 列尔涅尔 著

胡保生 译 徐俊荣 校

上海科学技术出版社 1963年2月第4版

內 容 提 要

本书阐述快速随动系统及调节器的基本观念及其計算和結構原理。扼要地叙述了这类系統的工程設計方法。并附有应用最佳系統理論来解决实际问题的例子。

本书可供自动化的工程技术人员及大专师生参考。

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ И РЕГУЛЯТОРОВ

А. Я. Лернер

Госэнергоиздат • 1961

自动化丛书(9)

快速随动系统及调节器的结构原理

胡保生 譯 徐俊荣 校

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出093号

商务印书馆上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印张 4 18/32 版面字数 98,000

1963年1月第1版 1963年1月第1次印刷 印数 1—3,600

統一书号 15119·1709 定价(十二) 0.54 元

編 者 的 話

近数十年来,随着世界各国科学技术、工业生产和軍事技术的飞跃发展,已促使“自动学与远动学”逐步成为一門新的学科;同时,由于自动学与远动学的理論与技术日臻完善,也进一步促使科学技术、工业生产和軍事技术的突飞猛进,如导弹、宇宙飞船、原子能的和平利用以及各类生产过程自动化工厂的出現,莫不与自动化技术的发展密切相关。因此,自动化在国民經济与国防中,已占有极为重要的地位。

在中国共产党的领导下,自动化技术在我国已有很大的进展,但从当前及今后要求来看,还需要繼續推广和普及专业知识,扩大技术队伍和提高理論水平。因此,及时地出版一些自动化技术的图书,供这个专业的技术人员参考,确是十分迫切需要的。

苏联国家动力出版社的“自动化丛书”选材广博,內容較新,也較切合实用,其中大部分作者都是苏联在这方面的专家,各册又具有理論与实际結合、深入浅出的特点,适合我国目前这方面的有关工程技术人員参考。我們現以选譯这套自动化丛书为基础,并适当編写一些专题論著,組成一套以有关工程技术人員及大专学生为讀者对象的“自动化丛书”,內容包括自动学和远动学的理論,自动装置、元件和仪器的設計、制造和应用等等。我們希望这套丛书的出版能对从事自动化方面的有关人員有所裨益。

由于我們的水平有限,在选题和譯校工作中,都可能有不妥之处,希望广大讀者和国内专家们指正。

自动化丛书編輯委员会

譯 者 序

近十年来，最佳控制理論和构成最佳控制系統的問題有很大发展，并已成为現代自动控制理論和技术发展中的核心問題之一。

本书所讲的快速随动系統及調節器，就是指調節过程時間为最短的最佳控制系統，也就是过渡过程的这一指标为最佳的控制系統。书中着重介紹构成这种系統的最佳控制理論与技术的基本观念和方法，并附有实际应用的例子。

实际上，本书內容主要反映作者本人从 1951 年起設計与研究自动檢測和調節单元組合系統所需快速自动补偿器（仪表）以来，在綜合和設計快速最佳控制系統方面的科学研究成果。书中的主要内容均曾在苏联“自动学与远动学”杂志上陸續发表过。

作者本人曾在 1957 年来我国讲学。有关快速控制系統的問題也曾是其所讲《生产过程自动化科学基础》的內容之一。

在本书里，作者已尽可能地以面向广大工程技术人员易于掌握和利用的观点，来介紹有关設計快速最佳控制系統的基本方法。但是，閱讀本书的讀者还需具备綫性自动調節理論和有关研究非綫性調節系統的一些基本知识，如相平面和相空間的概念以及諧波平衡法等。

胡 保 生

1962 年 7 月

原 序

自动调节理论的发展，已经能够顺利地解决即使在相当复杂的情况下使控制系统稳定的问题。近年来，在这个领域中工作的学者和工程师们，开始热衷于研究这样的问题，即建立一种自动控制系统，它能够具备所要求（给定）的各种性能，如：精确度、快速性、振荡性等。自然，此时首先要利用线性调节理论中已充分发展了的工具。但是，使实际工作者苦恼的是：基于线性方法所解决的有关自动控制系统品质问题的理论工作的结果，往往与试验数据有很大差异。

到本世纪50年代初，构成自动控制系统方面发展了新的方法。这种新方法既能解决建立具有给定性能的系统问题，又能达到理论与实践的一致。

当然，这种新方法的创立，要求阐明先前没有考虑到的和引起上述差异的各种因素。看来这些因素中主要的是下列两种：作用在系统上的扰动和干扰的随机性，以及改变控制对象状态的各种作用的限制性。

本书的目的在于阐明：当估计到作用的限制性时，构成自动控制系统的技术上的基本原理。

在研究自动控制系统时，须考虑各种作用的限制是很明显的。因为，这些限制无论在保证控制品质的主要指标问题方面，以及在决定控制系统的结构问题方面，都是起决定性影响的。所以，在解决自动控制系统综合问题时，不考虑各种限制而想保证得到最好的品质指标，将会陷于失败。这正如在设计某一工程建筑时，不考虑材料强度一样。不久就会明白，自动控制系统中象快速性这种重要指标，本质上取决于控制

系統各个坐标(控制作用、載能体的位势、运动部分的速度和加速度等等)的容許变化范围。

即使系統中只有一个坐标有限制性,就将单值地決定系統从一种状态过渡到另一种状态所能达到的极限最小时間。这时,如果需要达到最大的快速动作,則綜合系統控制部分的任务将为:拟訂这样一种对象的控制規律,它能保証調节時間尽可能接近在这一种限制下或几种限制下的极限可能值。

这种綜合控制装置的方法,将在本书有关的各章中加以叙述。

最佳控制理論方面的第一批著作就已經指明,最佳控制装置的結構主要取决于描写对象运动的微分方程阶数。对一阶和二阶的对象來說,不必将控制部分的結構和特性作多大的改动,就能使控制过程接近于最佳。对三阶的对象則已要求用相当复杂的控制装置;而对更高阶的对象來說,最佳控制装置的結構已复杂到这样地步,往往实际上实现起来认为是不合理的。而且,如要考虑进被控对象的附加自由度时,在快速性方面所得到的好处将大大减少。

这种情况决定了在构成快速系統时将控制对象加以理想化,而只用二阶或至多三阶的方程来描写对象的运动。这种理想化实际上是合理的。

虽然,最佳控制理論的发展总共还只十年左右,然而已經积累了大量的研究成果。但是在本书中,作者并不企图总结这些成就和阐述全部科学成果。这里仅考虑阐述有关构成快速随动系統和調节器的最佳控制理論与技术方面的基本思想。

因为本书主要供实际工作人員閱讀,所以着重阐述和論証构成快速系統的新方法,并用实例來說明这种方法。作者

深信,有关最佳控制理論的一些思想,如:作用的限制性的意义、可达到的极限快速性、非綫性反饋的利用等,这些都是决定最佳控制的一般概念,比之具体計算最佳控制装置的特性和高阶对象控制系統的結構等等,对实践来說更为重要。

最佳控制的理論离开其完成阶段还很远。

虽然,苏联科学院院士 I. C. 龐特略金和他的学生以及 R. 別尔曼的工作,得到了基础性的研究成果。但是,最佳控制的許多最重要問題尚未得到解决。属于这方面的問題例如有:构成近似最佳系統的問題,分布参数对象的最佳控制問題,最佳控制装置的綜合等。所有这些問題,現在正在大力进行研究,而且,无疑地将使自动控制的理論和技术得到进一步发展。

作者很感謝工程师 O. T. 瓦尔沙夫斯基,他参加了本书第 9、19 和 20 节的編写工作,并在本书付印时給予很大的帮助。

A. 列尔温尔

自动化丛书編輯委员会

主	編
趙安泰	虞冠新
編	委
王自琦	叶福年
甘和貴	汪时雍
吳增謙	吳培根
徐俊榮	黃淞
詹紀鴻	龔淡樵

目 录

譯者序

原 序

第一章 构成快速随动系统和调节器的任务	1
1. 动力学系统中限制过渡过程进行速度的因素	1
2. 决定随动系统快速性和准确度的参数	7
第二章 最佳控制过程	13
3. 动力学系统的状态空间	13
4. 最佳运动过程	15
5. 系统跟随变化给定状态的最佳过程形状	30
6. 在相空间中开关面的绘制	37
7. 最佳控制问题的分析解法	40
第三章 快速系统控制部分的构成原理	54
8. 控制装置的结构和特性	54
9. 滞后对象的控制	64
第四章 在有导数信号的抛物线变换器时随动系统的动态性能	69
10. 在相平面上对系统运动的研究	69
11. 负载对系统特性的影响	75
12. 最大偏差的估计	79
13. 速度限制和起动期间的加速度限制对系统动态性能 的影响	83
第五章 在有偏差信号的抛物线变换器时随动系统的动态性能	89
14. 系统的结构和运动方程式	89
15. 在相平面上对系统运动的研究	90
第六章 在有惯性放大器时最佳随动系统的动态性能	97
16. 有速度信号非线性变换器的系统	97
17. 有偏差信号非线性变换器的系统	105

18. 有非线性速度反馈的系统当有滞后时的自振荡	107
第七章 最佳控制装置的应用	112
19. 应用加快反馈的条件	112
20. 滞后对象的非线性调节器	117
21. 发电机电压的快速控制系统	121
22. 轧钢机飞剪的最佳控制系统	127
参考文献	131
补充参考文献	132
校后记	133

构成快速随动系统和调节器的任务

1. 动力学系统中限制过渡过程进行速度的因素

动力学系统从一种状态到另一种状态的过渡过程，总是与这些系统中各环节所储存的能量或物质的变化有关的。因此，任一动力学系统中过渡过程进行的猛烈程度，是由其各环节中的能流或物质流的多少所决定的。自动控制系统和随动系统是复杂的动力学系统，其过渡过程持续时间可利用以下的方法来缩短，即减小系统中储存能量的容器容量^①，或是增大通过系统中各元件的能流的功率。所有各种形式的提高自动控制系统快速性的方法，归根到底是上述两种方法之一。

缩减系统各环节容量的可能性，要受到强度（机械的、电气的、耐热的等等）条件、各元件间联系通道的长度以及其他情形的限制。

流过系统各环节的能流的功率限制，也有重大影响。这种限制的原因可归结为系统中许可负载的限制、参预过程中的物理媒质的能量位势的限制和系统各环节的饱和等等。当

① 自此以后，当提到能量贮存或能流时也相应地指物质贮存或物质流而言。——原注

然,自动控制系统和随动系统的结构选择与参数计算,正如任一工程建筑的计算一样,应根据施加在这些系统上的限制来考虑。当系统中流过的能流的功率有限制时,系统的结构和参数应选择得使能流的功率不超出确定的范围。

能流的功率和控制系统快速性间的关系,在电机方面已由苏联科学院 B. C. 庫列巴金院士首先确定^[1]。这种关系可以推广到任何动力学系统。

在自动控制和随动系统的实践中,往往能够指出系统中某些坐标值①受到限制的情况,如受到工艺过程的进行条件、装备动作的安全性、结构条件和强度条件等等限制。在线性系统中,有时将受限制的坐标表示成系统输出量导数的线性组合形式是很便利的。

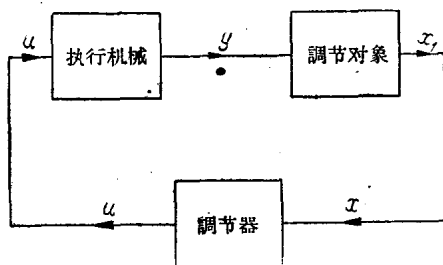


图1 单回路自动调节系统的结构图

图1是单回路自动调节系统的结构图。这里,坐标 y ——从其平均值算起的调节机构位置。 y 的变化范围由满足不等式

$$|y| \leq y^* \quad (1)$$

的数值所限制。

① 表征系统状态的量: 工作机构的位置、运动物体的速度、容器中的物质贮量等等,当作系统的坐标来看待。——原注

如果調節对象的运动由 n 阶微分方程描写, 而坐标 y 可用下列等式表示

$$y = a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n \quad (2)$$

則在考虑式(1)后, 得

$$\left| a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n \right| \leq y^* \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 綫性系統坐标的限制, 相当于被調量各导数的綫性組合的限制。

区别两种在原則上彼此不同的限制型式是很重要的。这种的区别决定于該坐标“不可能”或“不應該”越出某一範圍。

如果按系統的工作条件, 某一坐标“不應該”越出确定的範圍, 則称为有条件限制的坐标, 虽然在工作过程中它一般可能越出上述界限。例如, 串激电动机的轉速在負載轉矩相当小时, 可能增大到不允許的数值, 但是它“不應該”超过由电动机强度条件所决定的值。

与有条件限制的坐标相反, 在系統其他坐标無論采取何值(在自己的限制範圍內)时“不可能”越出一定範圍的那些坐标, 称为无条件限制的坐标。例如, 帶有被动負載(摩擦)和用外加电压来控制的两相异步电动机的轉速, 在任何控制电压下不可能越出同步轉速的範圍。所以, 按上面所采用的定义, 这个轉速就是一个无条件限制的量。

一个完善的自动控制系统, 應該保証各有条件限制的坐标在确定的範圍以內变化; 显然, 坐标属于无条件限制的那些系統, 就不需要这种保証。因为, 坐标的限制是系統本身所具有的秉性。

我們現在举一些技术裝置的例子，其中系統的某一坐标是有导数限制的。

图 2 所示的裝置其中导数是属于有条件限制的^①。在直流电动机中(图 2a)，机械强度的条件要求对电动机的轉速加

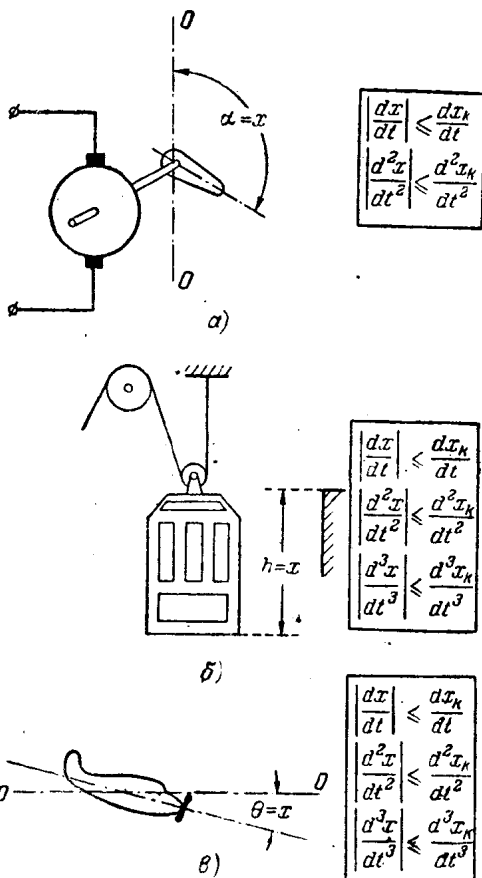


图 2 系統輸出量的各导数是有条件限制的裝置

^① 自图 2 以后， $\frac{dx_K}{dt}$ 即表示 $\left(\frac{dx}{dt} \right)_{x=x_K}$ 。——原注

以限制,而换向整流条件要求对电流加以限制,也即要求限制电动机产生的轉矩。因为,电动机的轉速决定了电动机軸位置的一阶导数值,而轉矩决定了軸位置的二阶导数值。所以,在自动控制系统中的直流电动机,可作为輸出量(电动机軸的轉角)的一阶和二阶导数有条件限制的元件。

对矿井卷揚机、高层楼房的电梯等等(图 26)來說,被控制量是升降箱的位置。这种装置的强度条件、动作的安全性和避免对人的器官(对載客电梯來說)有害的生理作用的条件,要求限制升降箱运动的速度、加速度和加速度的变化率。所以,在这里被控对象的輸出量的一阶、二阶和三阶导数是属有条件限制的。

如果控制对象是飞机(图 26),并把飞机軸綫离开水平面的偏差当作輸出量,則大家知道,此偏差的变化速度、加速度和加速度的变化率不應該超出許可范围,在这种情况下就必须把輸出量的一阶、二阶和三阶导数当作是有条件限制的。

图 3 表示的是这样一些装置的实例,它們的快速性是由各个系統的輸出坐标导数的无条件限制所决定的。

在带有被动負載的交流感应电动机中(图 3a),轉子的轉速無論如何都不能超出同步速的范围。而决定电动机加速度的轉矩,不管如何把电动机上所加的电压增大,由于磁路的饱和,不可能无限地加大。因此,感应电动机軸位置的一阶和二阶导数是无条件限制的。

在图 36 所示的容器中,水位变化的速度由进入和流出容器的液体流量来决定。因为,这两种流量值受到压力和系統的流体阻力所限制。所以,水位的变化速度、即水位这个坐标的一阶导数是无条件限制的。調节机构(閥門)移动的极限速度,还决定了水位的二阶导数的无条件限制性。

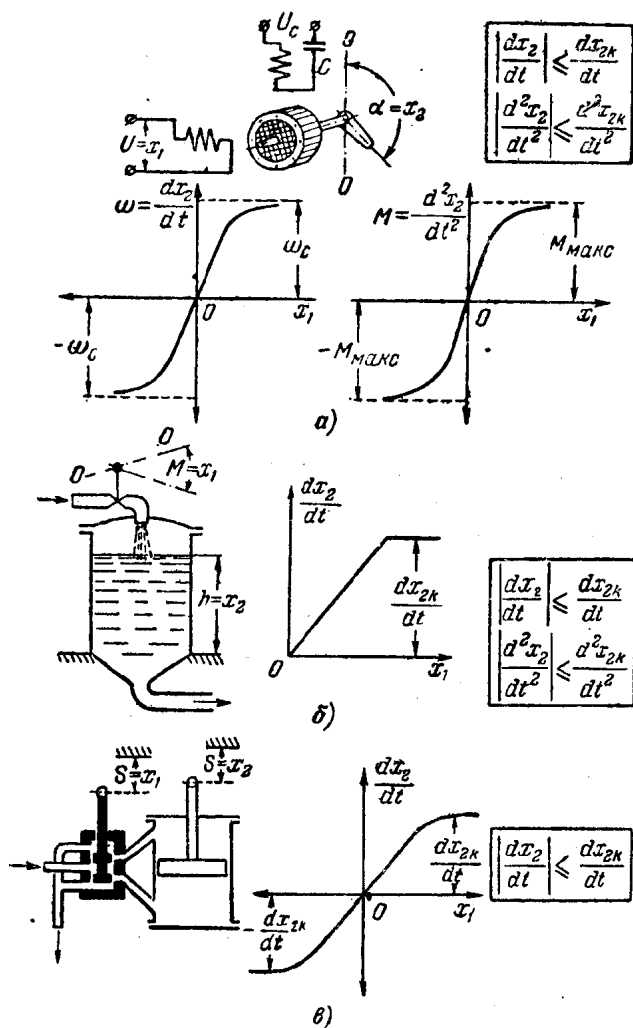


图3 系统输出量的导数是无条件限制的装置